

# Геотермический мониторинг как способ прогноза вулканических извержений и оценки геотермических ресурсов

А.В. Муравьев

Геологический институт РАН, Москва, Россия  
E-mail: [amur1909@mail.ru](mailto:amur1909@mail.ru)

Геотермический мониторинг является эффективным инструментом для прогноза вулканических извержений, а также для оценки геотермического потенциала геотермальных месторождений. Усиление магматической активности, индикатором которой является проникновение по разломам горячих вулканических газов, в последние годы наблюдается на вулкане Эльбрус. Поскольку Приэльбрусье является круглогодичным курортом мирового значения, в целях контроля вулканической и сейсмической активности, прогноза и снижения рисков извержения и землетрясений рекомендуется провести бурение параметрической скважины на склоне Эльбруса с установкой в ней подземной оптоволоконной системы мониторинга температуры и давления. В комплексе с микросейсмическими, гравиметрическими и инклинометрическими наблюдениями, спутниковой ИК-съемкой и геохимическими опробованиями газов, непрерывно получаемая информация о термодинамических условиях недр обеспечит надежный комплекс для оперативного прогноза природных геофизических катастроф. Утилизация геотермальной энергии магматического очага в искусственных циркуляционных системах небольших ГеоЭС, с закачкой воды с поверхности и получением перегретой воды и пара из добывающих скважин позволит снизить риски извержения и одновременно обеспечить курорт экологически чистой тепловой и электро- энергией. Для технологического обоснования строительства ГеоЭС также потребуется разведочное бурение в область горячих пород, поэтому информация о распределении температуры и давления вдоль ствола скважины, является ценной вдвойне.

На геотермальных месторождениях, находящихся в стадии разработки, для оценки пространственных неоднородностей фильтрационных характеристик может быть полезен метод «термического» гидропрослушивания – в качестве дополнения или альтернативы гидродинамическому гидропрослушиванию. Рекомендуется проведение такого эксперимента на Северо- Мутновском геотермальном месторождении.

**Ключевые слова:** геотермальный, мониторинг, оптоволоконные измерительные системы, Эльбрус, Мутновский, вулкан, прогноз, извержения вулканов, геотермальные энергетические ресурсы, тепловое гидропрослушивание

**Для цитирования:** Муравьев А.В. (2018). Геотермический мониторинг как способ прогноза вулканических извержений и оценки геотермических ресурсов. *Георесурсы*, 20(4), Ч.2, с. 413-422. DOI: <https://doi.org/10.18599/grs.2018.4.413-422>

## 1. Введение

Геотермический мониторинг в областях современного вулканизма нацелен на решение двух главных проблем – прогноза извержений и оценки перспектив развития геотермальной энергетики. Эти два круга задач тесно взаимосвязаны – изучение геотермальной активности вулканов в межпароксизмальную стадию дает основание для заключения о геологических условиях, рисках и экономической эффективности развития геотермальной энергетики вблизи вулкана. С другой стороны, активный отбор тепла магматического очага в процессе эксплуатации ГеоЭС приводит к непрерывному охлаждению недр, что может снизить риски извержений. Искусственная циркуляционная система, дающая энергию ГеоЭС, включает в себя десятки нагнетательных скважин с закачкой воды из поверхностных источников и десятки добывающих скважин с выносом на поверхность перегретого пара с температурой около 240-300°C. Как известно,

себестоимость электроэнергии, вырабатываемой ГеоЭС, в несколько раз ниже получаемой на дизельных тепловых электростанциях. Практическая неисчерпаемость вулканической энергии и экологически чистый характер ее утилизации по системе замкнутого цикла придают геотермальной энергетике абсолютную уникальность и привлекательность.

## 2. Геотермический мониторинг на вулкане Мутновский

Вулкан Мутновский, расположенный примерно в 70 км от г. Петропавловск-Камчатский, представляет собой идеальный полигон для проведения геотермического мониторинга благодаря наличию обширных фумарольных полей (Донного и Верхнего), расположенных в его Нижнем (северо-восточном) кратере, а также современной Активной воронки, которые находятся в пределах сравнительно легкой доступности для исследователей и туристов. Регулярные исследования теплового режима были начаты Б.Г. Поляком с коллегами в 1961, 1963 гг.

(Поляк, 1965, 1966; Вакин и др., 1966, 1976) и продолжены в 1980 и 1981 гг. (Муравьев и др., 1983; Поляк и др., 1985; Вакин и др., 1986). Термическая съемка fumarольных полей с помощью платиновых термометров сопротивления на различных глубинных срезах (15 см, 50 см и 100 см), панорамная ИК-съемка бортов Активной воронки, а также замеры температуры и расхода газа fumarол и горячих источников, позволили оценить величину тепловой мощности fumarольных полей северо-восточного кратера (около 380 МВт) и сделать вывод об относительной стабильности теплового режима вулкана в межпароксизмальную стадию. Так, геотермическая съемка с интервалом 17-18 лет на Донном поле северо-восточного кратера не выявила принципиальных изменений картины распределения температуры в грунте (Рис. 1). Выделяется лишь относительный разогрев грунта в 80-е годы на северном участке fumarольного поля, расположенном вблизи выхода экзтрузий и неков, согласно привязки к детальной геологической карте вулкана (Селянгин, 2016).

На протяжении всей истории формирования в течение голоцена вулкан Мутновский характеризовался относительно частыми (с периодичностью 4-60 лет) фреато-магматическими извержениями средней и малой мощности, с преобладающей СЗ направленностью взрывов (Мелекесцев и др., 1987). В 1980 году, как раз во время полевых работ на Мутновском, извергался соседний вулкан Горелый, имеющий с ним общий глубинный магматический очаг. Усиление прогрева грунта Донного поля в 1980-81 гг. укладывается в тенденцию нарастания активности вулканических процессов, что привело в итоге к очередному эпизоду эксплозивной деятельности Мутновского с фреатическим взрывом 17 марта 2000 года (Зеленский и др., 2002).

Большое количество осадков в районе вулкана обеспечивает высокий уровень естественной увлажненности грунтов и питание подземных вод. Вода, проникающая по трещинам и каналам на глубину десятков и сотен метров в

область горячих пород, непрерывно промывает вулканические породы и разгружается в виде парогидротерм и горячих источников, создавая предпосылки для развития геотермальной энергетики. Эти гидрогеотермальные ресурсы в виде перегретого пара и горячих подземных вод были вскрыты бурением. В 1999 г. на базе Северо-Мутновского геотермального месторождения была запущена в эксплуатацию Верхне-Мутновская ГеоЭС мощностью 12 МВт, а в 2002 г. были введены в эксплуатацию два энергоблока крупнейшей в России Мутновской ГеоЭС мощностью 50 МВт, которые вместе покрывают около 17% электропотребления Камчатского края; в перспективе предполагается включение новых энергоблоков с увеличением мощности Мутновских ГеоЭС до 200 МВт (<https://minzkh.kamgov.ru/shema-i-programma-razvitia-energetiki-kamcatskogo-kraa>).

Для контроля рисков извержений в будущем, а также с целью повышения рентабельности ГеоЭС целесообразно продолжить геотермический мониторинг Мутновского месторождения на качественно новом уровне. Десятки скважин на Северо-Мутновском геотермальном месторождении в настоящее время выведены из эксплуатации ввиду недостаточного притока теплоносителя. Это означает, что циркуляционная система работает неэффективно и требуется ее оптимизация. Остановленные глубокие скважины (глубиной свыше 2000 м) являются отличными кандидатами для перевода их в разряд наблюдательных с установкой в них систем подземного мониторинга с датчиками температуры и давления. Сеть таких опорных скважин позволит создать основу для проведения метода гидропрослушивания. Этот метод основан на анализе времени прохождения и изменения амплитуды импульса давления, переданного от возмущающей скважины до реагирующих (наблюдательных) скважин. Он широко применяется при разработке месторождений нефти и газа с целью оценки анизотропии фильтрационных свойств и выявления гидродинамической связи между скважинами (Stewart, 2011). Импульс давления, создаваемый

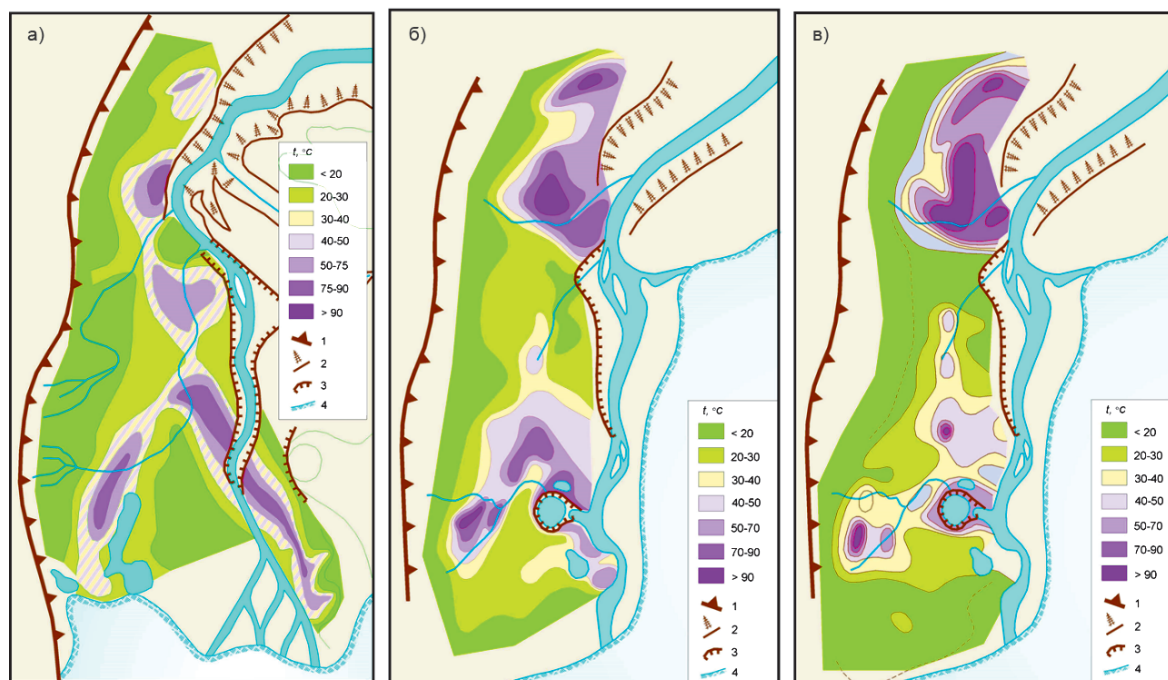


Рис. 1. Температура грунтов на глубине 15 см на Донном fumarольном поле, СВ кратер, вулкан Мутновский, в 1963, 1980 и 1981 гг. (Поляк, 1965; Муравьев и др., 1983)

путем приостановки добычи или, наоборот, нагнетанием воды в ранее бездействующую скважину, регистрируется цифровыми скважинными термо-манометрами с достаточно высокой разрешающей способностью по давлению (0,03 кПа) и по температуре (0,005°C). Такие метрологические параметры являются стандартными для современных скважинных кварцевых термо-манометров ([www.slb.com](http://www.slb.com)). Если изменение давления не фиксируется в течение длительного периода времени, существенно превышающее оценочное, то гидродинамическая связь между скважинами отсутствует. Если отмечено изменение давления, то исследования продолжают для получения кривой реагирования. Количественная интерпретация данных гидропрослушивания выполняется с помощью программы для гидродинамической интерпретации, например Saphir™ или PanSystem™.

Хотя современные скважинные термо-манометры автоматически измеряют как давление, так и температуру, на практике для гидродинамической интерпретации нефтяниками используется только параметр давления. Температура служит главным образом для корректировки реологических свойств пластовых флюидов. Это связано с тем, что тепловой импульс подвержен сравнительно быстрой релаксации за счет теплообмена со всеми вмещающими породами, тогда как импульс давления распространяется только в пределах пласта-коллектора и при отсутствии гидродинамических барьеров может быть зарегистрирован на расстоянии до 1-1,5 км от возмущающей скважины. Однако, по мнению автора, в случае применения метода гидропрослушивания на геотермальном месторождении можно эффективно использовать оба измеряемых параметра: давление и температуру. Предпосылки успешности применения такого «термодинамического» гидропрослушивания следующие:

- Идентичность уравнений теплопроводности и пьезопроводности дает возможность применять аналогичные алгоритмы для интерпретации данных гидродинамического и термического гидропрослушивания;

- Высокая проницаемость пласта на геотермальном месторождении и, следовательно, быстрая фильтрация теплоносителя от возмущающей скважины позволяет рассчитывать на то, что амплитуда теплового импульса на наблюдательной скважине будет достаточно велика (> 1°C) для надежной количественной интерпретации;

- Относительно близкие расстояния между скважинами (порядка 100-200 м) также способствуют быстрому прохождению импульса;

- Имеется возможность создать импульс высокой амплитуды путем закачки воды с контрастной температурой (холодной воды в горячие породы);

- Эффективность эксперимента можно повысить путем применения химических маркеров (tracers) при закачке в возмущающую скважину;

Сравнение результатов классического гидродинамического и термического методов гидропрослушивания в рамках одного и того же эксперимента позволит оценить эффективность последнего, и в случае успеха рекомендовать его к применению на объектах, где гидродинамическое гидропрослушивание малоэффективно, например, на газовых месторождениях.

В нашем случае гидропрослушивание на Мутновском геотермальном месторождении можно рекомендовать с целью создания гидродинамической модели месторождения, определения фильтрационно-емкостных свойств природного резервуара, выявления зон высокой проводимости и непроницаемых барьеров, планирования геолого-технологических мероприятий для повышения эффективности разработки.

### 3. Геологические риски в районе вулкана Эльбрус

Главными источниками потенциальных чрезвычайных ситуаций в районе Эльбруса являются, наряду с климатическими, геологические факторы: вулканизм и сейсмичность. Ускоренное таяние и обрушение ледников, сход снежных лавин и селей также во многом предопределяются разогревом грунтов, выходом теплых газов и источников на склонах Эльбруса, а также сейсмической активностью. Периодичность катастрофических извержений вулкана Эльбрус составляет несколько сотен лет. Последнее сильнейшее извержение с радиусом разброса вулканических бомб до 700-800 км произошло около 1800 лет назад (Богатиков и др., 1998; Рогожин и др., 2001; (Изменения окружающей среды..., 2007)). В последние годы вновь отмечаются повышение уровня сейсмичности и разогрев поверхности вулканического конуса, что может свидетельствовать об активизации процессов в магматическом очаге (Изменения окружающей среды..., 2008; <https://geocenter.info/article/sejsmicheskaja-aktivnost-vulkana-elbrus>). Вулканическая постройка Эльбруса характеризуется отсутствием обширных фумарольных полей и явных признаков современной вулканической активности в кратере, однако имеются косвенные признаки активизации вулкана в последние годы. Выявлены отдельные небольшие фумаролы на седловине и в боковом кратере, отмечен разогрев грунта до +21°C на Западной вершине, что привело к появлению колонии зеленых мхов на высоте 5621 м, в то время как окружающий воздух остывает до -20°C и ниже (Лиходеев, 2013). Анализ температуры земной поверхности в районе вершинных кратеров Эльбруса по данным спутников NOAA, температуры минеральных источников в окрестностях вулкана, свидетельствуют о выраженной тепловой аномалии, приуроченной к вулкану, а магнитотеллурические и гравиметрические данные указывают на наличие приповерхностной магматической камеры и глубинного очага под вулканической постройкой (Богатиков, 2006). Сотрудниками Института Физики Земли им. О.Ю. Шмидта в течение ряда лет проводятся комплексные геофизические исследования, включая режимные замеры температуры в штольне, построенной на склоне Эльбруса в рамках проекта «Нейтрино», а также замеры температуры фумарол, поверхности склона вулкана и температуры придонного слоя воды новообразованного озера у подножья ледника Малый Азау (Глобальные изменения..., 1997; Рогожин и др., 2001; Лиходеев, 2013; Горбатиков и др., 2018). По замерам на стенках штольни был установлен геотермический градиент 160 мК/м. Исследователи делают вывод о развитии тепловых процессов на поверхности вулканической постройки Эльбруса, которые привели к интенсивному таянию некоторых ледников за последние годы. Глубина залегания



нижнего (материнского) магматического очага оценивается глубиной от 20 до 40 километров. Согласно уточненным данным, верхняя магматическая камера в районе вулканической постройки расположена в интервале глубин 1-10 км ниже уровня моря, ее приведенные размеры находятся в пределах 8-9 км, а температура верхней кромки камеры составляет около 850°C (Лиходеев, 2013). Исследования методом микросейсмического зондирования (ММЗ) вдоль субмеридионального профиля через Восточную вершину Эльбруса подтвердили наличие двух магматических очагов по отчетливой области низких скоростей сдвиговых волн (Горбатилов и др., 2018). Глубины залегания верхнего очага оцениваются в 7-13 км ниже уровня моря, а нижнего – на глубинах от 18 до 40 км, причем и до глубин свыше 50 км не наблюдается отчетливой нижней границы очага. Несмотря на безусловную ценность всех существующих способов наблюдений температурного режима вулкана Эльбрус, они не решают задачу оперативного прогноза извержения. Пожалуй, только спутниковая ИК-съемка при условии регулярных повторных исследований может дать достоверный краткосрочный прогноз. Однако такие исследования являются дорогостоящими и выполняются с большими перерывами, так что при внезапном развитии процесса наблюдатели могут легко пропустить момент резкого нарастания активности вулкана и перехода в критическую фазу.

Экономически более эффективным решением, к тому же дающим непрерывный поток информации, может стать установка датчиков мониторинга температуры максимально близко к магматическому очагу. В связи с активизацией вулканических процессов задача комплексного мониторинга изменения геофизических полей вокруг Эльбруса является весьма актуальной. В первую очередь, важно контролировать динамику изменения различных предвестников извержения, каковыми являются: уменьшение глубинности гипоцентров микросейсмических событий, деформация (в особенности, вспучивание) земной поверхности в области над магматическим очагом, рост температуры недр вблизи вулкана и изменение газо-гидрогеохимического состава флюидов из фумарол и термальных источников. Последовательное уменьшение глубин гипоцентров свидетельствует о подъеме магмы к поверхности. В ряде случаев по скорости подъема магмы удавалось точно предсказать время извержения за три месяца до начала события, например, вулкана Килауэа, Гавайи, в 1959 г (Расп, 1982). Впрочем, вероятность точного прогноза начала извержения по микросейсмическим данным значительно выше для эффузивных извержений щитовых вулканов «гавайского» типа. Стратовулканы, к которым относится Эльбрус, более коварны, поскольку магма, имеющая более кислый состав, является более вязкой и малоподвижной, а главным источником энергии извержений является длительно накапливавшееся давление вулканических газов. Как известно, вулканические газы – важнейший фактор, вызывающий вулканические извержения (Расп, 1981). Вспучивание поверхности из-за давления скопившихся газов может указывать на приближение эксплозивного извержения, сопряженного с наибольшими рисками для населения из-за его внезапности и катастрофических последствий. Исторические примеры таких катастроф, как гибель Помпеи при извержении

Везувия (79 г.), гибель г. Сен-Пьер при извержении Мон-Пеле, о. Мартиника (1902 г.), извержение вулкана Сент Хеленс, США (1980 г.) и т.д., ставят перед человечеством задачу необходимости повышения точности прогнозов времени, характера и масштабов природных катаклизмов.

#### 4. Постановка задачи подземного мониторинга

Особо ценную информацию могут дать системы подземного мониторинга температуры, давления и микросейсмичности, установленные в достаточно глубоких наклонных скважинах, направленных в сторону магматического очага. Датчики должны отвечать требованиям высокой точности и долговременной стабильности измерений в условиях агрессивной среды (сероводород, растворы кислот, и т.п.). Измерительную систему следует размещать вдоль всего ствола скважины с целью получения пространственной динамической картины теплового поля, вариаций пластового давления и уровня подземных вод, локализации очагов сейсмических событий. Современные технологии позволяют поместить многопараметрическую измерительную систему в скважине на едином геофизическом кабеле.

Считается, что магма разогрета в верхней вулканической камере под Эльбрусом до 1000-1100°C, поэтому геотермический градиент в наклонной скважине, пробуренной в сторону магматического очага может составлять 140-160 мК/м, а температура на забое скважины глубиной 1800 м может достигать 260-290°C даже при допущении чисто кондуктивного характера теплопередачи от кромки магматической камеры к поверхности. Однако возможен и дополнительный конвективный разогрев вулканической постройки путем проникновения по разломам горячих вулканических газов из магматического очага. Кроме того, при нарастании магматической активности глубинные температуры тоже будут расти, поэтому следует применять технологические решения, рассчитанные на высокие температуры. Указанным требованиям соответствуют оптоволоконные системы (ОВС) мониторинга, широко применяемые в нефтяной промышленности с целью мониторинга паронагнетательных, высокотемпературных добывающих, а также геотермальных скважин. Возможности работы большинства современных скважинных электронных датчиков ограничены температурой 177°C ([www.slb.ru](http://www.slb.ru)); они также в большей мере подвержены воздействию агрессивной среды и механических повреждений.

Бурение разведочной скважины в область горячих пород позволит изучить не только термический режим в недрах вулкана, но и наличие подземных вод, их химический состав, степень раздробленности и проницаемость горных пород. Все это важно не только для контроля рисков извержения, но и для оценки перспектив экологически чистой геотермальной энергетики с целью дальнейшего развития инфраструктуры курорта.

Возникает вопрос, где и на какую глубину целесообразно вести бурение для решения всего комплекса поставленных задач? Как отмечалось, скважина должна быть наклонно-направленная в сторону магматического очага, глубиной до 1800 м, пробуренная с соблюдением всех мер безопасности и с учетом рисков встретить

аномально высокие температуры, давления и сероводород при проходке вулканических газовых карманов и зон разломов. Следует учитывать и неизбежные природные трудности – резко расчлененный рельеф, суровый климат и разреженный воздух на большой высоте, высокую твердость скальных пород и крайне высокую «экологическую чувствительность» курортной местности. В том случае, если скважина покажет перспективность разработки геотермических ресурсов, может потребоваться достаточно обширная площадка для строительства комплекса ГеоЭС и сети геотермальных скважин, защищенная от схода снежных лавин и селей. Как один из возможных вариантов площадки под бурение автор рекомендует рассмотреть относительно ровный участок в районе станции «Мир» (Рис. 2) канатной дороги «Азау» (а.о. около 3400 м). Вероятно, найдутся и другие подходящие участки для геотермального разведочного бурения на склоне Эльбруса. Главными необходимыми условиями здесь является возможность подъезда буровой техники и безопасность работ.



Рис. 2. Вид на долину Азау от станции «Мир» канатной дороги (фото: Мочалов, 2017). Ровная площадка на высоте около 3500 м с подъездной дорогой – потенциально удобное место для бурения разведочно-наблюдательной геотермальной скважины

## 5. Системы подземного мониторинга

Современные оптоволоконные (ОВ) системы подземного мониторинга обладают рядом несомненных преимуществ по сравнению с приповерхностными термодатчиками и спутниковой ИК-съемкой:

- Реальные измерения температуры можно выполнять в максимальной близости от объекта исследования (магматического очага);
- Непрерывность наблюдений обеспечивает оперативный контроль при внезапных изменениях теплового режима;
- Объем поступающей информации в процессе мониторинга легко оптимизировать путем записи данных в ждущем режиме;
- Автоматическая передача данных в режиме реального времени – через спутниковую систему SCADA в центр сбора и анализа информации – обеспечивает удобство и безопасность работ;
- Появляется реальная возможность контроля изменений газо-гидротермальной активности по разломам, связывающим магматический очаг с поверхностью;

- Проведение комплекса разнообразных геофизических измерений в скважине при помощи датчиков, установленных на едином геофизическом (оптическом) кабеле обеспечивает высокую информативность системы и надежность прогноза извержений;

Недостатком является довольно высокая стоимость проекта бурения и заканчивания скважины с системой ОВ мониторинга.

## 6. Технологические решения

Успешные и многократно испытанные технологические решения для подземного мониторинга в экстремально жестких условиях разработаны, в частности, в ведущих нефтесервисных компаниях – Шлюмберже (Schlumberger) и Везерфорд (Weatherford). Оптоволоконные измерительные системы, в отличие от электронных датчиков, устойчивы к воздействию механических ударов, вибрации, химически агрессивных веществ и выдерживают гораздо более высокие температуры и давления.

Компания Шлюмберже, работающая в России с 1991 года, располагает системой волоконно-оптического мониторинга Sensa™, дающей возможность надежно и точно получать и передавать данные профиля температуры по стволу в режиме реального времени. ОВ система контроля температурного профиля по стволу паронагнетательных скважин рассчитана на рабочие температуры до 250°C; в системе дополнительно имеется также встроенный дискретный датчик давления и температуры. В нефтедобыче мониторинг температуры чаще всего применяется при таком способе добычи, как паро-гравитационное дренирование (SAGD). Динамика изменений профиля температуры вдоль горизонтального участка ствола применяется для повышения эффективности нагнетания пара в пласт и помогает выявить места прорыва и притока флюидов (воды, пара, газа, нефти) в скважину.

ОВ системы мониторинга компании Везерфорд отличаются большим разнообразием предлагаемых технических решений для подземного мониторинга и включают помимо датчиков температуры и давления такие опции, как скважинные сейсмоприемники и расходомеры. Оптимальная конфигурация подбирается в зависимости от решаемых задач в нефте- и газодобывающих, паронагнетательных и геотермальных скважинах. Важным преимуществом этих систем является то, что датчики монтируются на едином ОВ кабеле. В арсенале компании имеются системы, рассчитанные на рабочую температуру до 300°C и агрессивную среду, что особенно важно для решения задач вулканологии. Датчики на ОВ кабеле подразделяются на две группы – дискретные, принцип работы которых основан на использовании решеток Брэгга, и датчики распределенной температуры (DTS), использующие преломление луча в ММ-световоде. Обычно применяют комбинации датчиков разного типа благодаря возможностям специального трехжильного оптического кабеля (Рис. 3).

**Оптоволоконный кабель.** ОВ кабель имеет три жилы: две одномодовых (SM, *single mode*), предназначенные только для работы с датчиками на решетках Брэгга, и одну многомодовую (MM, *multi-mode*), служащую для измерения профиля распределенной температуры (DTS, *Distributed Temperature Sensing*). Кабель надежно защищен

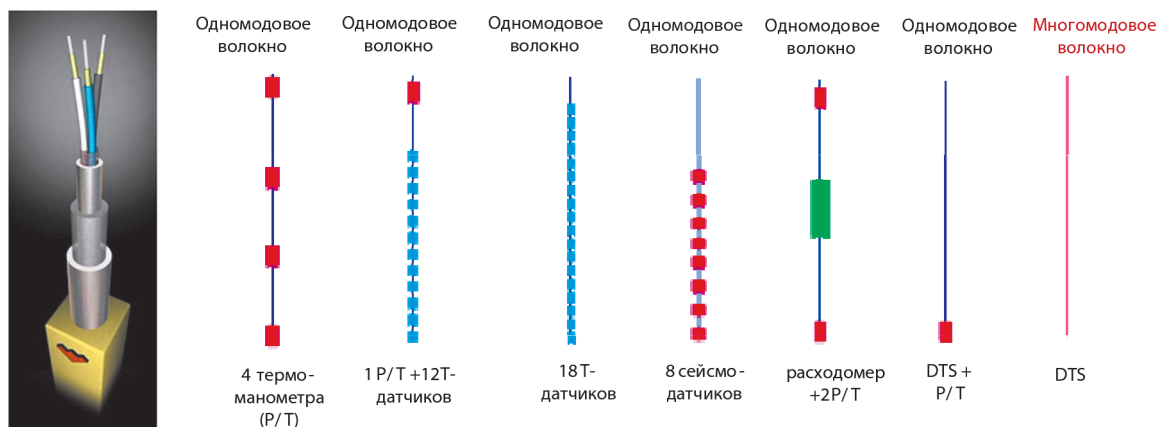


Рис. 3. Гибкая конфигурация датчиков в оптоволоконных системах мониторинга компании Везерфорд ([www.weatherford.com](http://www.weatherford.com))

от внешних химических и механических воздействий. На каждой жиле SM можно установить до 8 сейсмоприемников или систему из 12 микродатчиков температуры, а также различные комбинации термо-манометров (P/T) с другими датчиками.

**Датчики P/T на решетках Брэгга.** Принцип работы датчиков на решетках Брэгга (FBG) следующий. Световой пучок направляется через ядро световода. Часть пучка света – только на длине волны решетки – отражается обратно. Приложенная деформация изменяет длину отраженной волны FBG. Наземная аппаратура обнаруживает сдвиг длины волны, обусловленный деформацией сенсора. Заводские калибровки преобразуют длину волны в измерения давления и температуры.

**Технология DTS (Distributed Temperature Sensing).** Для непрерывного мониторинга профиля температуры по стволу скважины используется многомодовое оптическое волокно. В системе DTS оптоволоконный кабель сам по себе является распределенным датчиком температуры. Измерения DTS основаны на принципе комбинационного (Рамановского) обратного рассеяния. Интенсивность измеряемого сигнала зависит от энергетического состояния оптического волокна. Температура рассчитывается по соотношению интенсивности пиков Стокса / Анти-Стокса. Система DTS может быть использована для выявления прорыва газа и воды, динамики изменения теплового поля вдоль ствола скважины. Точность замера температуры DTS повышается в комбинации с использованием точечных датчиков в качестве реперных замерных устройств.

**Сейсмический мониторинг – система Clarion™.** Примером успешно выполненного проекта может служить мониторинг микросейсмических событий, давления и температуры в скважине Т-24 на месторождении Тенгиз (Казахстан) ([www.weatherford.com](http://www.weatherford.com)). Микросейсмические датчики были установлены в заброшенной добывающей скважине, которую перевели в разряд наблюдательных. По требованию заказчика система мониторинга должна работать в течение многих лет, поэтому была выбрана долговечная оптическая сейсмическая система Clarion™ (Рис. 4). Работу пассивных датчиков акселерометра в скважине поддерживает ОВ система; при этом совершенно отсутствует скважинная электроника, что обеспечивает этой сенсорной системе высокую надежность. Дизайн косы состоит из восьми сейсмоприемников, установленных на разной глубине, каждый из которых включает три

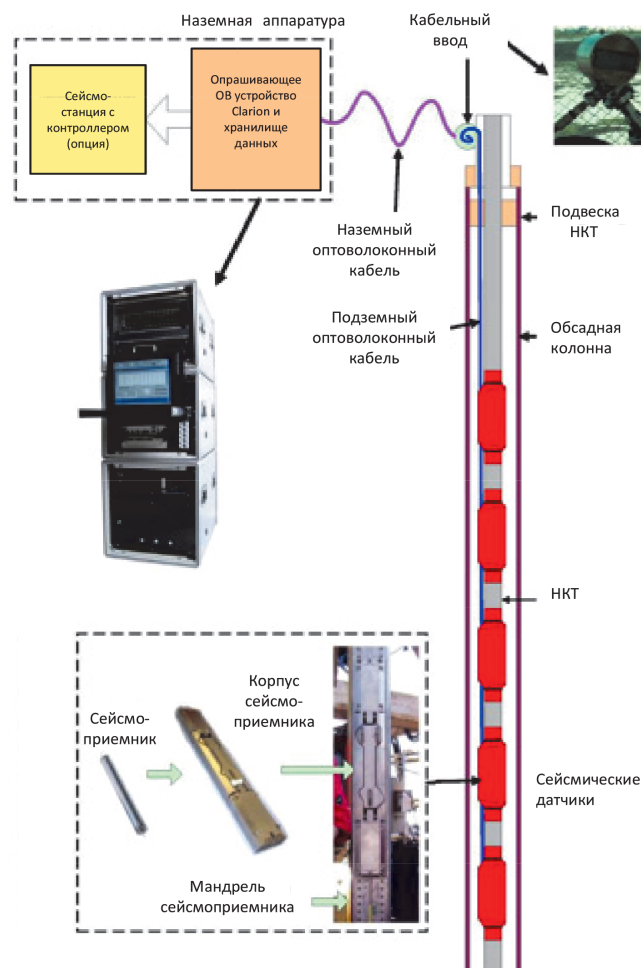


Рис. 4. Скважинная сейсмическая оптоволоконная система Clarion™. Процесс монтажа на месторождении Тенгиз ([www.weatherford.com](http://www.weatherford.com))

акселерометра в координатах (XYZ). Общая длина косы составляла более 500 м. Сейсмоприемники смонтированы на специально разработанных мандрях в составе компоненты заканчивания. Оптоволоконный кабель закреплен хомутами на каждой секции насосно-компрессорных труб (НКТ) – до устья скважины. После монтажа на заданной глубине датчики были развернуты перпендикулярно обсадной колонне, тесно связанной с геологической формацией через цементное кольцо. Развернутые держатели датчиков предназначены также для того, чтобы изолировать сейсмодатчики от шумов в эксплуатационной НКТ, увеличивая отношение сигнал/шум. Поскольку выходным



сигналом является лазерный луч, в скважинной системе отсутствуют электрические помехи. Для минимизации погрешности оценки локализации микросейсмических событий, была проведена физическая ориентация датчиков в стволе скважины. Это было сделано с использованием специального инструмента и гироскопа внутри НКТ. Ориентация задала абсолютное направление сенсоров X и Y относительно магнитного Севера.

Поверхностная аппаратура, расположенная на расстоянии нескольких сотен метров от устья скважины, была подключена через оптический кабель и введена в эксплуатацию для записи данных в октябре 2006 года, и до настоящего времени на ней производится запись данных в непрерывном режиме. По продвижению фронта микросейсмических событий удается контролировать процесс разработки месторождения в радиусе 15 км. Аналогичным образом на Эльбрусе можно отслеживать динамику движения магмы к поверхности и моменты образования разломов в земной коре.

**Технология LxDATA™.** Технология LxDATA™ с рабочей температурой до 300 °С, разработанная специально для паронагнетательных скважин, является наиболее экономически эффективным решением с применением подземных ОВ систем мониторинга ([www.weatherford.com](http://www.weatherford.com)). Она рассчитана на установку до 40 точечных датчиков температуры по стволу на одной ОВ жиле, с датчиком давления на конце кабеля (Рис. 5; табл. 1).



Рис. 5. Схема компоновки внутрискважинных датчиков и наземной части системы мониторинга

Параметр	Значение
<b>Эксплуатационные характеристики</b>	
Диапазон измеряемых температур	от -40° до 300°С
Точность измерения температуры	± 0,5 °С
Разрешение при измерении температуры	± 0,01 °С
Скорость обновления	1 sec/ канал
Стандартный эксплуатационный срок службы	>10 лет
<b>Конфигурация системы</b>	
Количество каналов на модуль	до 32
Количество датчиков /кабель	до 40
Максимальная длина кабеля датчика	1800 м
Номинальный шаг между датчиками	20 м
Максимальная длина наземного кабеля	5000 м
<b>Наземны контрольно-измерительный модель</b>	
Тип корпуса шкафа	Корпус NEMA
Требования к наземному питающему напряжению	500 Вт (встроенный блок бесперебойного питания с резервным аккумулятором)
Протокол передачи данных	MODBUS/ TCP
Рабочая температура наземного кабеля	от -50 °С до +85 °С
<b>Условия эксплуатации</b>	
Максимальная рабочая температура	300 °С
Рабочее давление	от 500 до 8500 кПа
Температура хранения шкафа	От -20 °С до +50 °С

Таблица 1. Технические характеристики ОВ системы мониторинга LxDATA™ ([www.weatherford.com](http://www.weatherford.com))

Компоновка внутрискважинных датчиков позволяет использовать конфигурации с 10, 20 или 40 датчиками температуры и индивидуальной расстановкой датчиков и шагом между ними (Рис. 6). Система обеспечивает точный и четкий контроль температуры в режиме реального времени, что позволяет использовать ее для мониторинга интенсивности выхода горячих вулканических газов по разломам и оперативного прогноза извержений. При этом не требуется калибровка внутрискважинной и наземной оптоволоконных линий, а устанавливаемые датчики при необходимости можно использовать повторно.

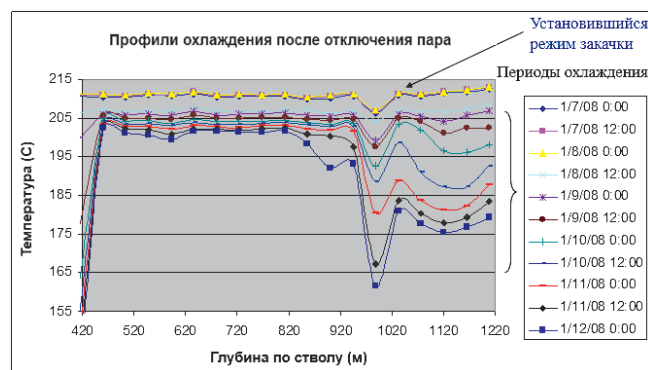


Рис. 6. Пример термического мониторинга системой LxDATA™. Динамика изменения температуры по стволу горизонтальной скважины в течение пяти суток после остановки закачки пара показывает зону притока пластового флюида в интервале 960-1000 м

Система LxDATA является экономически эффективным альтернативным решением для высокотемпературного мониторинга. В ней вместо дорогостоящего трехжильного ОВ кабеля используется оптический световод, помещенный вместе с микродатчиками температуры в капиллярную трубку ¼” из устойчивого к коррозии сплава Inconel 718/625. На конце капилляра помещается микродатчик давления с рабочим давлением 8,5 МПа (Рис. 7). Для осуществления спуска системы датчиков в наклонно-направленную скважину применяют гибкие насосно-компрессорные трубы (ГНКТ) (Рис. 8).

Система мониторинга управляется с поверхности из помещения, где установлена наземная аппаратура для считывания и хранения данных (Рис. 9). От устья скважины (через кабельный ввод) до центра управления передача сигналов идет по наземному оптоволоконному кабелю. Оперативный контроль осуществляется в режиме реального времени, через графический интерфейс пользователя и системы воспроизведения. Данные накапливаются в памяти устройства, где хранятся три месяца с последовательным обновлением записи. Возможно удаленное конфигурирование и обновление программного обеспечения, а также доступ к данным через веб-приложения.

На устье скважины целесообразно установить автоматическую систему мониторинга с геохимическими датчиками концентрации кислых вулканических газов (H<sub>2</sub>S, CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, HCl, HF). Данные компоненты наряду с водяным паром представляют не менее 95% объема газов вулканических и геотермальных систем и служат индикаторами активности вулканических процессов. Например, мониторинг количества эманаций SO<sub>2</sub> в кальдере вулкана

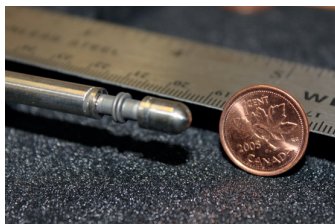


Рис. 7. Датчик давления на конце капиллярной линии ([www.weatherford.com](http://www.weatherford.com))

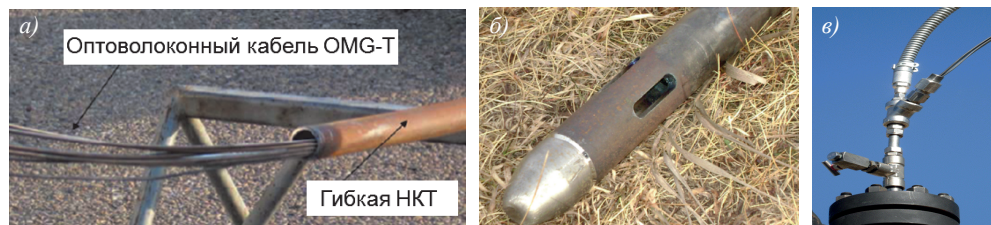


Рис. 8. Гибкие НКТ (а, б) диаметром 1,25 дюйма для установки датчиков ТР в скважине; (в) Кабельный ввод на устье скважины. ([www.weatherford.com](http://www.weatherford.com))



Рис. 9. Аппаратная стойка центра управления (а) и контрольная панель (б) размером 19" ([www.weatherford.com](http://www.weatherford.com))

Килауэа, проводимый исследователями с 1979 г., показал, что в периоды, непосредственно предшествующие извержениям, отмечается значительное увеличение интенсивности выноса диоксида серы (Sutton, Elias, 2014). Так, уже за месяц до начала извержения в марте 2008 г., количество выносимого  $SO_2$  увеличилось в два раза.

## 7. Экономичные варианты мониторинга

Имеются варианты, не требующие бурения скважин, но предоставляющие ценную оперативную информацию о вулканической активности. В первую очередь, речь идет о мониторинге теплового состояния и газо-гидрогеохимического состава флюидов на фумарольных полях в седловине и восточной части склона, в зоне Горячих Нарзанов, а также, если будет возможность, и в кратере вулкана. Иными словами, там, где на поверхности уже имеются или вероятнее всего смогут проявиться признаки усиления тепломассопереноса от магматической камеры вследствие миграции горячих газов по разломам.

На фумарольных полях целесообразно установить ИК-тепловизоры с целью проведения непрерывного мониторинга температуры поверхности грунта в областях наибольшей фумарольной активности. Спутниковая передача данных может обеспечить оперативность реагирования в случае угрозы извержения. Установка датчиков мониторинга температуры и концентрации вулканических газов в кратерах вулкана имеет смысл только в случае признаков геотермальной активности и возможности открытого доступа в кратер.

В настоящее время кратеры находятся под толщей льда и снега, хотя на восточной стенке Бокового кратера (Рис. 10) участниками туристических маршрутов отмечены слабые фумаролы. Помимо датчиков температуры вблизи фумарол целесообразно установить и геохимические датчики концентрации вулканических газов.



Рис. 10. Боковой кратер, на восточной стенке которого отмечены слабые фумаролы (фото из Интернета)

## Выводы

Геотермический мониторинг является действенным инструментом прогноза вулканических извержений, а также оценки геотермического потенциала геотермальных месторождений.

Метод «термического» гидропрослушивания – в качестве дополнения или альтернативы гидродинамическому гидропрослушиванию – может оказаться вполне успешным при оценке пространственных неоднородностей фильтрационных характеристик в системе подземной циркуляции на геотермальных и газовых месторождениях, проводимой с целью повышения эффективности разработки. Рекомендуется проведение такого эксперимента на Северо-Мутновском геотермальном месторождении.

В целях контроля за вулканической активностью и оценки перспектив развития геотермальной энергетики региона было бы целесообразным бурение наблюдательной скважины глубиной до 1800 м на склоне вулкана Эльбрус, направленной в сторону магматического очага. В качестве возможного места для буровой площадки следует рассмотреть участок в районе станции «Мир» канатной дороги Азау.

Для повышения надежности прогноза внезапных вулканических извержений рекомендуется применять современные оптоволоконные телеметрические системы подземного мониторинга, включающие косу датчиков температуры, давления и микросейсмических событий.

## Благодарности

Автор признателен коллегам Б.Г. Поляку, М.Д. Хуторскому и В.Ю. Лаврушину за ценные советы и замечания. Работа выполнена в рамках Государственной бюджетной темы № 0135-2015-0021.



## Литература

- Богатиков О.А. и др. (1998). Радиоуглеродное датирование голоценовых извержений вулкана Эльбрус (Северный Кавказ, Россия). *Докл. РАН*, 363(2), с. 219-221.
- Богатиков О.А. (2006). Исследование «спящих» вулканов. Сб.: Лекции лауреатов Демидовской премии (1993-2004). Екатеринбург: Изд-во Екб. Ун-та, с. 483-495.
- Вакин Е.А., Кирсанов И.Т., Пронин А.Л. (1966). Активная воронка Мутновского вулкана. *Бюлл. вулк. ст.*, 40, с. 25-35.
- Вакин Е.А., Кирсанов И.Т., Кирсанова Т.П. (1976). Термальные поля и горячие источники Мутновского вулканического массива. *Гидротермальные системы и термальные поля Камчатки*. Владивосток, с. 85-114.
- Вакин Е.А., Пилипенко Г.Ф., Сугробов В.М. (1986) Общая характеристика Мутновского месторождения и прогнозная оценка ресурсов. Геотерм. и геохим. иссл-я высокотемпературных гидротерм. Москва: Наука, с. 6-40.
- Горбатов А.В., Рогожин Е.А., Степанова М.Ю., Харазова Ю.В., Рыбин А.А., Сысолин А.И., Андреева Н.В. (2018). Особенности глубинного строения и вулканической активности горы Эльбрус по комплексу геолого-геофизических данных. *Материалы 50 Тектонического совещания: Проблемы тектоники и геодинамики земной коры и мантии*. Москва: Изд-во ГЕОС, Т.2, с. 149-154.
- Глобальные изменения природной среды и климата (1997). *Избранные научные труды ГНТПР*. Под Ред. Ак. Лаверова Н.П. Москва, 433 с.
- Зеленский М.Е., Овсянников А.А., Гавриленко Г.М., Сениюков С.Л. (2002). Извержение вулкана Мутновский (Камчатка) 17 марта 2000 г. *Вулканология и сейсмология*, 6, с. 25-28.
- Изменения окружающей среды и климата (2007). Природные и связанные с ними техногенные катастрофы. Программа №16 Президиума РАН. Том 1. Сейсмический процессы и катастрофы, новейший вулканизм... Куратор Ак. Лаверов Н.П. ИГЕМ РАН, 198 с.
- Изменения окружающей среды и климата (2008). Программа №16 Президиума РАН. Природные и связанные с ними техногенные катастрофы. Том 2. Новейший вулканизм Северной Евразии: закономерности развития, вулканическая опасность, связь с глубинными процессами и изменениями природной среды и климата. Отв.ред.: Коваленко В.И., Ярмлюк В.В., Богатиков О.А. ИГЕМ РАН, ИФЗ РАН.
- Лиходеев Д.В. (2013). Исследование теплового и наведенного волновых процессов в районе Эльбрусского вулканического центра. *Автореф. дисс. к.ф.-м.н.* Москва.
- Мелекесцев И.В., Брайцева О.К., Пономарева В.В. (1987) Динамика активности вулканов Мутновский и Горелый в голоцене. *Вулканол. и сейсмология*, 3, с. 3-18.
- Мочалов А. (2017). Подъем на Эльбрус – фоторепортаж. <http://www.mochaloff.ru/elbrus-azau>
- Муравьев А.В., Поляк Б.Г., Турков В.П., Козловцева С.В. (1983). Повторная оценка тепловой мощности фумарольной деятельности вулкана Мутновского (Камчатка). *Вулканол. и сейсмология*, 5, с. 51-63.
- Поляк Б.Г. (1965). Тепловая мощность межпароксимальной стадии активности Мутновского вулкана. *Доклады АН СССР*, 162(3), с. 643-646.
- Поляк Б.Г. (1966). Геотермические особенности области современного вулканизма. Москва: Наука, 180 с.
- Поляк Б.Г., Безух Б.А., Кафтан В.И. и др. (1985). Опыт наземной ИК-съемки для оценки температуры и теплоизлучения термальных полей вулкана Мутновского (Камчатка). *Вулканол. и сейсмология*, 3, с. 54-63.
- Расп Х. (2013). Вулканы и вулканизм. Москва: Мир, 344 с.
- Рогожин Е.А., Соболевич Л.Е., и др. (2001). Геодинамика, сейсмо-тектоника и вулканизм Северного Кавказа. Под Ред. Ак. Лаверова Н.П. Отчет по подпрограмме ФЦНТП «Глобальные изменения природной среды и климата». 338 С.
- Селягин О.Б. (2016). Строение, вещество и близповерхностные очаги вулканов Мутновский и Горелый (Мутновский геотермальный район, Камчатка). Ч.1-IV. В кн.: *Горный информационно-аналитический бюллетень*, спецвыпуск №31. Изд-во «Горная книга», с. 348-438.
- Stewart G. (2011). Welltest design and analysis. PenWell Corp., Tulsa, USA, 1483 p.
- Sutton A.J., Elias T. (2014). One Hundred Volatile Years of Volcanic Gas Studies at the Hawaiian Volcano Observatory. In: *Characteristics of Hawaiian Volcanoes*. Editors: M.P. Poland, T.J. Takahashi, C.M. Landowski., Ch.7. Pp. 295-320. USGS Professional Paper 1801.

## Сведения об авторе

*Александр Владимирович Муравьев* – канд. геол.-мин. наук, старший научный сотрудник, Лаборатория тепломассопереноса

Геологический институт РАН  
Россия, 119017, Москва, Пыжевский пер, д. 7

Статья поступила в редакцию 11.07.2018;

Принята к публикации 16.09.2018; Опубликована 30.11.2018

IN ENGLISH

## Geothermal monitoring as a way to predict volcanic eruptions and estimate geothermal energy resources

*A.V. Muravyev*

*Geological Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation  
E-mail: amur1909@mail.ru*

**Abstract.** Geothermal monitoring is an effective tool for predicting volcanic eruptions, as well as for assessing the geothermal energy potential of geothermal areas. Increased magmatic activity, an indicator of which is the penetration of hot volcanic gases through faults, has been observed in recent years on the Elbrus volcano. Since Elbrus is a year-round resort of world importance, in order to control volcanic and seismic activity, forecast and reduce the risks of eruption and earthquakes, it is recommended to drill a observation well on the slope of Elbrus with the installation of an underground fiber-optic system for temperature and pressure monitoring. In combination with microseismic, gravimetric and inclinometric observations, satellite IR imaging and geochemical gas testing, the continuously obtained information on the thermodynamic conditions of the subsoil will provide a reliable complex for the operational forecast of natural geophysical disasters. Utilization of the geothermal energy of the magma chamber in the artificial circulation systems of small GeoPPs, water

injection from the surface and obtaining superheated water and steam from producing wells will reduce the risks of eruption and at the same time provide the resort with environmentally friendly thermal and electric power. Technological justification for the construction of a GeoPP will also require exploratory drilling to the area of hot rocks, therefore information on the distribution of temperature and pressure along the wellbore is doubly valuable.

In geothermal fields that are under development, to assess the spatial heterogeneity of the filtration characteristics can be a useful method of “thermal interference testing” – as a complement or alternative to hydrodynamic interference testing. It is recommended to conduct such an experiment at the North Mutnovsky geothermal field.

**Key words:** Geothermal, monitoring, fiber optic measuring systems, Elbrus, Mutnovsky, volcano, prediction, volcanic eruptions, geothermal energy resources, thermal interference testing

**Recommended citation:** Muravyev A.V. (2018). Geothermal monitoring as a way to predict volcanic eruptions and estimate geothermal energy resources. *Geosursy = Georesources*, 20(4), Part 2, pp. 413-422. DOI: <https://doi.org/10.18599/grs.2018.4.413-422>

### Acknowledgements

The author is grateful to colleagues B.G. Polyak, M.D. Khutorskoy and V.Y. Lavrushin for valuable advice and comments. Work is performed under the State budget theme No. 0135-2015-0021.

### References

- Bogatikov O.A. (2006). Issledovanie «spyashchikh» vulkanov [The study of «sleeping» volcanoes]. Sb.: Lektsii laureatov Demidovskoi premii (1993-2004) [Coll. papers: Lectures of the Demidov Prize winners (1993-2004)]. Ekaterinburg: Ekb. Univer. publ., pp. 483-495. (In Russ.)
- Bogatikov O.A. et al. (1998). Radiouglerodnoe datirovanie golotsenovykh izverzhenii vulkana El'brus (Severnyi Kavkaz, Rossiya) [Radiocarbon dating of the Holocene eruptions of Elbrus volcano (North Caucasus, Russia)]. *Dokl. RAN = Proc. of the Russian Academy of Sciences*, 363(2), pp. 219-221. (In Russ.)
- Global'nye izmeneniya prirodnoi sredy i klimata [Global environmental and climate change]. (1997). *Izbrannye nauchnye trudy GNTPR*. Ed. Ak. Laverova N.P. M.: 433 p. (In Russ.)
- Gorbatikov A.V., Rogozhin E.A., Stepanova M.Yu., Kharazova Yu.V., Rybin A.A., Sysolin A.I., Andreeva N.V. (2018). Osobennosti glubinnogo stroeniya i vulkanicheskoi aktivnosti gory El'brus po kompleksu geologo-geofizicheskikh dannykh [Features of the deep structure and volcanic activity of Mount Elbrus using the complex of geological and geophysical data]. V Sb.: *Problemy tektoniki i geodinamiki zemnoi kory i mantii* [Coll. papers: Problems of tectonics and geodynamics of the crust and mantle]. Moscow: GEOS, V.2, pp. 149-154. (In Russ.)
- Izmeneniya okruzhayushchei sredy i klimata. Prirodnye i svyazannye s nimi tekhnogennye katastrofy [Environmental and climate change. Natural and related technological disasters]. (2007). Program No. 16 of the Presidium of the Russian Academy of Sciences. Vol.1: Seismic processes and catastrophes, recent volcanism. Ed.: Laverov N.P. Moscow: IGEM RAN, 198 p. (In Russ.)
- Izmeneniya okruzhayushchei sredy i klimata. Prirodnye i svyazannye s nimi tekhnogennye katastrofy [Environmental and climate change. Natural and related technological disasters]. (2008). Program No. 16 of the Presidium of the Russian Academy of Sciences. Vol.2: The newest volcanism of Northern Eurasia: patterns of development, volcanic danger, connection with deep-seated processes and changes in the natural environment and climate. Ed.: Kovalenko V.I., Yarmolyuk V.V., Bogatikov O.A. Moscow: IGEM RAN, IFZ RAN. (In Russ.)
- Likhodeev D.V. (2013). Issledovanie teplovogo i navedennogo volnovykh protsessov v raione El'brusskogo vulkanicheskogo tsentra [Study of thermal and induced wave processes in the area of the Elbrus volcanic center]. *Avto-ref. diss. k.f.-m.n.* [Abstract Cand. phys. and math. sci. diss.]. Moscow.
- Melekestsev I.V., Braitseva O.K., Ponomareva V.V. (1987). Dinamika aktivnosti vulkanov Mutnovskii i Gorelyi v golotsene [Dynamics of activity of Mutnovsky and Gorely volcanoes in the Holocene]. *Vulkanol. i seismologiya = Volcanology and seismology*, 3, pp. 3-18. (In Russ.)
- Mochalov A. Climbing to Elbrus – photo essay. <http://www.mochaloff.ru/elbrus-azau>
- Muravyev A.V., Polyak B.G., Turkov V.P., Kozlovitseva S.V. (1983). Povtornaya otsenka teplovoi moshchnosti fumarol'noi deyatel'nosti vulkana Mutnovskogo (Kamchatka) [Re-evaluation of the thermal power of the fumarole activity of the Mutnovsky volcano (Kamchatka)]. *Vulkanol. i seismologiya = Volcanology and seismology*, 5, pp. 51-63. (In Russ.)
- Polyak B.G. (1965). Teplovaya moshchnost' mezhparksizmal'noi stadii aktivnosti Mutnovskogo vulkana [Thermal power of the interparoxysmal stage of activity of the Mutnovsky volcano]. *Doklady AN SSSR* [Proc. of the USSR Academy of Sciences], 162(3), pp. 643-646. (In Russ.)
- Polyak B.G. (1966). Geotermicheskie osobennosti oblasti sovremennogo vulkanizma [Geothermal features of the area of modern volcanism]. Moscow: Nauka, 180 p. (In Russ.)
- Polyak B.G., Bezukh B.A., Kaftan V.I. et al. (1985). Opyt nazemnoi IK-s'emyki dlya otsenki temperatury i teploizlucheniya termal'nykh polei vulkana Mutnovskogo (Kamchatka) [Experience of ground-based IR imaging to assess the temperature and radiation of thermal fields of the Mutnovsky volcano (Kamchatka)]. *Vulkanol. i seismologiya = Volcanology and seismology*, 3, pp. 54-63. (In Russ.)
- Rasp Kh. (2013). Vulkany i vulkanizm [Volcanoes and volcanism]. Moscow: Mir, 344 p. (In Russ.)
- Rogozhin E.A., Sobisevich L.E., et al. (2001). Geodinamika, seysmotektonika i vulkanizm Severnogo Kavkaza [Geodynamics, seismotectonics and volcanism of the North Caucasus]. Ed.: Ak. Laverov N.P. Report. 338 p. (In Russ.)
- Selyangin O.B. (2016). Stroenie, veshchestvo i blizpoverkhnostnye ochagi vulkanov Mutnovskii i Gorelyi (Mutnovskii geotermal'nyi raion, Kamchatka) [Structure, substance and near-surface foci of the Mutnovsky and Gorely volcanoes (Mutnovsky geothermal area, Kamchatka)]. Part I-IV. V kn.: *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'* [Book: Mining information and analytical bulletin], special issue no. 31. Gornaya kniga publ., pp. 348-438. (In Russ.)
- Stewart G. (2011). Welltest design and analysis. PenWell Corp., Tulsa, USA. 1483 pp.
- Sutton A.J. and Elias T. (2014). One Hundred Volatile Years of Volcanic Gas Studies at the Hawaiian Volcano Observatory. In: Characteristics of Hawaiian Volcanoes. Editors: M.P. Poland, T. J. Takahashi, and C.M. Landowski, Ch.7. P.295-320. USGS Professional Paper 1801.
- Vakin E.A., Kirsanov I.T., Kirsanova T.P. (1976). Termal'nye polya i goryachie istochniki Mutnovskogo vulkanicheskogo massiva [Thermal fields and hot springs of the Mutnovsky volcanic massif]. *Gidrotermal'nye sistemy i termal'nye polya Kamchatki* [Hydrothermal systems and thermal fields of Kamchatka]. Vladivostok, pp. 85-114. (In Russ.)
- Vakin E.A., Kirsanov I.T., Pronin A.L. (1966). Aktivnaya voronka Mutnovskogo vulkana [The active funnel of the Mutnovsky volcano]. *Byull. vulk. st.* [Bull. volc. Art.], 40, pp. 25-35. (In Russ.)
- Vakin E.A., Pilipenko G.F., Sugrobov V.M. (1986). Obshchaya kharakteristika Mutnovskogo mestorozhdeniya i prognoznaya otsenka resursov. Geoterm. i geokhim. issl-ya vysokotemperaturnykh gidroterm [General characteristics of the Mutnovsky field and the prediction resource estimate. Geothermal and geochemical studies of high-temperature hydrotherm]. Moscow: Nauka, pp. 6-40. (In Russ.)
- Zelenskii M.E., Ovsiyannikov A.A., Gavrilenko G.M., Senyukov S.L. (2002). Izverzhenie vulkana Mutnovskii (Kamchatka) 17 marta 2000 g. [Mutnovsky volcano eruption (Kamchatka) on March 17, 2000]. *Vulkanologiya i seismologiya = Volcanology and seismology*, 6, pp. 25-28. (In Russ.)

### About the Author

Alexander V. Muravyev – PhD (Geology and Mineralogy), Chief Researcher, Heat and Mass Transfer Laboratory Geological Institute of the Russian Academy of Sciences 7, Pyzhevsky lane, Moscow, 119017, Russian Federation

Manuscript received 11 July 2018;

Accepted 16 September 2018;

Published 30 November 2018